

中文引用格式:田水承,李红妍,石炎彬,等. 警觉度影响下矿工风险感知能力识别模型[J]. 中国安全科学学报,2026,36(2):1-8.

英文引用格式:TIAN Shuicheng, LI Hongyan, SHI Yanbin, et al. Identification model of miners' risk perception ability under influence of alertness level[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 1-8.

警觉度影响下矿工风险感知能力识别模型*

田水承^{1,2}教授, 李红妍^{1,2}, 石炎彬³, 田方圆^{**1,2,4}讲师,
王亚娟^{1,2}, 段梦菲^{1,2}

- (1 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;
2 西安科技大学 安全与应急管理研究所, 陕西 西安 710054;
3 洛阳钼业集团股份有限公司 选矿二公司, 河南 栾川 471500;
4 西安科技大学 管理学院, 陕西 西安 710054)

中图分类号:X911

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.0465

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助(C类)(52504244); 教育部人文社会科学青年基金资助(23XJC630011); 教育部产学研合作协同育人实践条件和实践基地建设项目(2507032817); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBQN-0499)。

【摘要】 为探究矿工警觉度对风险感知的影响规律, 基于文献调研, 设计开展矿工警觉度测试与风险感知试验, 采集被试的近红外信号、行为与外周生理数据, 运用正态性检验、单因素方差分析(ANOVA)等方法, 探究不同警觉度矿工的风险感知差异性; 优选13项显著差异指标作为特征指标, 引入正弦混沌映射麻雀搜索算法优化反向传播神经网络(Sine-SSA-BP), 构建矿工风险感知能力分类识别模型。结果表明: 矿工警觉度对风险感知能力存在显著影响, 警觉度升高, 矿工风险感知正确率显著提升; 随着矿工警觉度的升高, 矿工的背外侧前额叶区域以及额极区激活指数 β 值具有显著差异, 皮肤电(EDA)中的皮肤电导平均值(SC_{mean})显著升高, 心率变异性(HRV)中的平均心跳间期(Mean_{IBI})、心跳R-R间期标准差(SDNN)、连续心跳间期差值均方根(RMSSD)显著降低, 平均心率(Mean_{HR})显著升高; 构建的矿工风险感知能力分类识别模型综合性能最优, 准确率高达92.30%, 模型具备较好的鲁棒性。

【关键词】 警觉度; 矿工; 风险感知能力; 识别模型; 功能性近红外光谱技术(fNIRS); 正弦混沌映射麻雀搜索算法优化反向传播神经网络(Sine-SSA-BP)

Identification model of miners' risk perception ability under influence of alertness level

TIAN Shuicheng^{1,2}, LI Hongyan^{1,2}, SHI Yanbin³, TIAN Fangyuan^{1,2,4},
WANG Yajuan^{1,2}, DUAN Mengfei^{1,2}

- (1 College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China; 2 Institute of Safety and Emergency Management, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China; 3 The Second Company of Luoyang Molybdenum Group Co., Ltd., Luanchuan Henan 471500, China; 4 College of Management, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China)

* 文章编号:1003-3033(2026)02-0001-08; 收稿日期:2025-10-11; 修稿日期:2025-12-15

** 通信作者:田方圆(1990—),女,陕西西安人,博士,讲师,主要从事安全、管理、认知神经和工效学视域下的安全人因工程、应急管理和职业安全与健康等方面的研究。E-mail:tfy@xust.edu.cn。

Abstract: In order to explore the influence of miners' alertness on risk perception ability, miners' alertness tests and risk perception experiments were designed and implemented. During the experiments, fNIRS, behavioral data, and peripheral physiological signals were collected. Methods such as the normality test and one-way analysis of variance (ANOVA) were applied to investigate the differences in risk perception ability among miners with different alertness levels. Thirteen significantly different indicators were selected as feature variables. Thirteen significant differential indicators were selected as feature indicators, and Sine-SSA-BP was introduced to construct a classification and recognition model for miners' risk perception ability. The results show that miners' alertness significantly affects their risk perception ability. With increasing alertness, the correct rate of risk perception improves notably. As the alertness level rises, significant differences appear in the activation index β values of the dorsolateral prefrontal cortex and frontopolar areas. The mean skin conductance (SC_mean) in electrodermal activity (EDA) increases significantly, while the mean inter-beat interval (Mean_IBI), standard deviation of normal to normal R-R intervals (SDNN), and root mean square of successive differences (RMSSD) in heart rate variability (HRV) decrease significantly, and mean heart rate (Mean_HR) increases. The constructed miners' risk perception ability classification and identification model based on the Sine-SSA-BP achieves an accuracy of 92.30%, demonstrating excellent overall performance and robustness.

Keywords: alertness; miners; risk perception ability; identification model; functional near-infrared spectroscopy (fNIRS); sine chaotic mapping sparrow search algorithm-back propagation neural network (Sine-SSA-BP)

0 引言

2021年,新修订的《中华人民共和国安全生产法》^[1]明确提出“树牢安全发展理念,从源头上防范化解重大风险”,推动煤矿安全管理模式从传统的“隐患三违+事故追责”被动应对型,向“风险预控+源头治理”主动防控型转变。在风险管控关口前移的新要求下,矿工的风险感知能力成为风险预控体系的“第一道防线”^[2]。矿工的风险感知能力受个体状态的影响,警觉度作为保持注意力集中与风险敏感性的关键指标,是影响风险感知能力的核心因素。因此,揭示矿工警觉度与风险感知的关联机制,开展风险感知能力研究是提升矿工有效规避危害的能力的重要切入点。

风险感知作为涉及认知的复杂执行任务,是矿工产生不安全行为的重要影响因素^[3]。现有研究多从心理特质、生理状态及行为等维度探讨其关联与影响。李乃文等^[4]采用试验研究睡眠剥夺对矿工风险感知的影响,分析了矿工的皮肤电与心率变异性指标的变化特征,结果表明:睡眠剥夺会损害矿工的风险感知能力。倪国栋等^[5]综合眼动追踪试验与主观风险倾向量表,分析风险倾向对风险感知的影响,得出不同风险倾向的新生代建筑工人其感知水平存在显著差异。SASAKI等^[6]认为,危险感

知任务中对风险级别的评估正确率能够有效表征危险感知能力。马颖等^[7]证明反向传播(Back Propagation, BP)神经网络能够应用于风险感知状态的分类识别,且表现出较好的性能,但此类方法尚未拓展至矿工风险感知识别研究中。当前对风险感知的研究多数仅依赖于主观与部分客观数据,针对于风险感知的认知特性,从脑神经科学视角出发,探究其风险感知过程的神经认知机制成为重要的研究主题。警觉度作为风险感知的重要影响因素,其变化对个体行为调控具有显著影响。CHANDRAKUMAR等^[8]通过模拟轮班作业试验,证实警觉度水平偏移会引起注意力资源分配失衡,导致对危险信号的监测效率下降。同时,研究得出矿工在高温高湿环境中警觉度下降时,其反应时间(Reaction Time, RT)延长与错误次数增加,进而影响矿工对潜在危险的判断与应对能力^[9]。CANALES-JOHNSON等^[10]认为个体警觉状态会影响人的认知控制,进而影响认知过程的效率。国内外学者证实警觉度的波动会引起行为变化,但针对一线矿工高集中作业状态的特殊需求,警觉度对风险感知的影响关系仍有待明确。

鉴于此,文中聚焦于矿工警觉度对风险感知的试验研究,通过引入新兴的功能性近红外光谱技术(functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS),结合Ergolab 3.0同步平台,采集矿工的生理数据与行为

数据,运用正态性检验、单因素方差分析等方法,探讨矿工警觉度对风险感知的影响规律,并基于此,构建正弦混沌映射麻雀搜索算法优化 BP 神经网络 (Sine Chaotic Mapping Sparrow Search Algorithm-BP Neural Network, Sine-SSA-BP) 的矿工风险感知能力分类识别模型,评估模型性能综合探究风险感知的分类识别状况,以期为提高煤矿安全生产效率提供有效支持。

1 警觉度与风险感知试验

1.1 被试选取与特征说明

基于科学性与可操作性的原则,选取陕北某矿 40 名一线矿工作为被试,被试的平均年龄为 (36.3±6.7) 岁,工龄为 3~5 年,教育程度均为高中及以上,具备丰富的工作经验和实际操作背景。此外,所有被试均为右利手,身体健康、视力正常,且无不良生活习惯或精神药物治疗史 (如兴奋剂、抗焦虑药、镇静剂等),确保试验数据的可靠性和可比性。

1.2 风险感知任务材料与构建原则

采用相关煤炭网站收集与实地采集的方法,获取包括人的因素、设备状态、环境条件与管理体系 4 个维度的真实图像,构建风险感知试验专用情境图片数据库。为降低图片难度差异对结果的影响,从图片清晰度、风险要素可见性以及场景复杂度 3 个维度分级筛选,剔除模糊图像与超复杂场景图片,4 种风险维度等比例选取共 40 张。引入风险紧迫度这一关键评价指标,要求被试对风险的来源与紧迫程度进行综合打分,紧迫程度判断依据专家打分法确定,剔除偏离客观的打分,取 11 位专家的打分平均值作为标准风险紧迫程度,以此来反映其对不同风险的主观判断与优先处理意愿。

1.3 生理与脑功能数据采集设备

采用津发科技 Ergolab 3.0 人机环境同步平台采集系统采集外周生理数据,以反映被试的生理变化。采用 Cortivision Photon Cap 无线便携式近红外光学脑成像系统获取被试近红外信号,用于分析被试前额叶脑区的变化。

采用 10-10 定位法,确保覆盖前额叶脑区,利用 10 个光源探头和 7 个接收探头,构成 20 个通道的连续波近红外采集系统,通道间距保持在大约 30 mm,如图 1 所示。图 1 中,灰色为发射极,黑色为接收极,C 为通道,前极区 (Frontopolar, Fp),前额叶 (Anterior Frontal, AF),额叶表示为 F,大脑左右半球

中线处表示为 z。通道覆盖感兴趣区域 (Region of Interest, ROI),包括背外侧前额叶皮层 (C5、C11、C12、C13、C14、C15、C16、C17、C18、C19),额极区 (C6、C7、C8、C9) 和眶额叶 (C1、C2、C3、C4),图中 Fpz 为前级正中区域,AFz 为前额叶正中区域,Fz 为额叶正中区域。

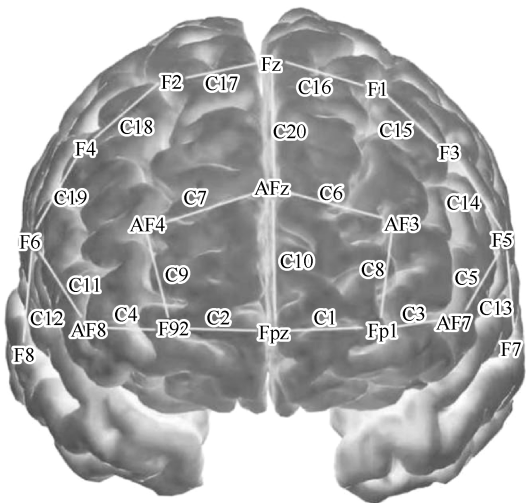


图 1 3D 通道布局
Fig. 1 3D channel layout

1.4 警觉度与风险感知任务流程设计

基于文献 [11], 5 min 的精神运动警觉任务 (Psychomotor Vigilance Task, PVT) 可以有效测定矿工的警觉度水平。因此,设计并开展 5 min 的 PVT 任务,被试者对每个刺激的反应作为其 RT,用以评估其在测试期间注意力与响应能力。开始试验后,红色圆点在 15 000~20 000 ms 随机出现,红色圆点出现后,被试需尽快点击空格确认,随后进入下一试次。

风险感知任务使用 E-Prime 3.0 软件编制并呈现。任务开始时,呈现指导语并告知流程,接着显示 20 000 ms 的注视点,注视点消失后,呈现风险图片。被试需在 20 000 ms 内观察图片中的风险并在 10 000 ms 内回答 2 个问题:风险来源 (设备故障、操作失误、环境、管理) 和风险紧迫度 (1-5, 极其紧迫到几乎不紧迫),同时记录回答。

1.5 指标选取与数据预处理

E-Prime3.0 软件记录矿工选择,使用正确率来反映矿工的风险感知能力,2 问题均答对的图片记为“正确”;生理指标由 Ergolab 3.0 软件预处理,包括降噪、平滑处理等步骤。在皮肤电 (Electrodermal Activity, EDA) 分析中,选取皮肤电导平均值 (Skin

Conductance Mean, SC_mean)、皮肤电导标准差 (Skin Conductance Standard Deviation, SC_std) 指标来表征不同警觉度被试的自主神经系统活动水平。在心率变异性 (Heart Rate Variability, HRV) 分析中,选取平均心跳间期 (Mean Inter-Beat Interval, Mean_IBI)、平均心率 (Mean Heart Rate, Mean_HR)、心跳 R-R 间期标准差 (Standard Deviation of Normal to Normal R-R Intervals, SDNN)、连续心跳间期差值均方根 (Root Mean Square of the Successive Differences, RMSSD) 来反映被试自主神经系统的功能及其调节能力。fNIRS 数据通过 Matlab 的 NIRS-KIT 工具进行转化、校正、滤波等步骤处理,使用一般线性模型 (General Linear Model, GLM) 从 Oxy-Hb 数据中提取 β 值,以此作为神经指标量化被试在风险感知任务中的脑功能活动特征。

2 不同警觉度水平下矿工风险感知结果分析

2.1 警觉度水平划分

通过 PVT 任务获取 RT,并结合警觉度定义与相关研究^[12],将其划分为高、中、低 3 种警觉度水平,具体分类标准见表 1。结果显示,40 名被试中,低警觉度、中警觉度、高警觉度占比分别为 25%、35%、40%,且对各等级矿工的 RT 进行显著性检验,结果表明:其 RT 具有显著性差异($p<0.05$)。

表 1 警觉度水平划分依据

Table 1 Basis for dividing alertness levels	
警觉度水平	RT 范围
高警觉度	$<I_m-0.5\times T_s$
中警觉度	$[I_m-0.5\times T_s, I_m+T_s]$
低警觉度	$>I_m+T_s$

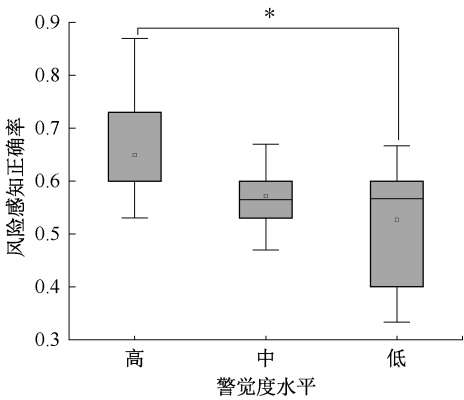
注: I_m 为警觉度反应时的平均值; T_s 为标准差。

2.2 矿工风险感知行为数据

采用 SPSS27.0 对 3 种警觉度水平矿工的风险感知正确率进行正态检验,结果表明:矿工风险感知正确率服从正态分布($p>0.05$)。通过单因素方差检验 (Analysis of Variance, ANOVA) 对比 3 种警觉度水平矿工的风险感知正确率。结果显示,矿工的警觉度对其风险感知正确率具有显著影响($p=0.012<0.05$)。

随着警觉度水平的升高,矿工风险感知正确率显著提升,如图 2 所示。高警觉度有助于维持持续注意,从而提升矿工对作业环境中潜在危险的感知

能力,这一发现与注意资源理论^[13]一致,即高警觉度状态下矿工能有效分配更多的认知资源用于风险捕捉与判断,从而提升任务表现。低警觉度下,注意资源不足导致其无法充分加工环境中的信息,可能忽视重要信号,导致反应延迟或感知失误。



注: * 为 $p<0.05$ 。

图 2 不同警觉度矿工风险感知正确率差异

Fig. 2 Accuracy of risk perception among miners varies with different levels of alertness

2.3 矿工风险感知外周生理数据

正态性检验结果显示,指标服从正态分布($p>0.05$)。采用 ANOVA 检验低、中、高警觉度水平矿工在风险感知任务过程中的生理指标变化,如图 3 所示。结果表明:低警觉度到高警觉度 SC_mean 增加 43.63%,Mean_IBI 下降 11.26%,Mean_HR 升高 19.89%,SDNN 下降 40.25%,RMSSD 下降 47.67%。

随着警觉度的升高,矿工的 SC_mean 显著增加,表明高警觉度矿工的交感神经系统被激活,情绪和生理反应更加敏感,这与注意资源理论^[13]相一致。Mean_IBI、SDNN、RMSSD 指标下降,Mean_HR 则显著升高。这表明:高警觉度下,矿工的交感神经系统更加活跃,副交感神经系统的活动相对减弱,矿工处于较高的生理唤醒状态,为快速应对环境中的风险做好准备。

2.4 矿工风险感知 fNIRS 数据

从神经科学角度入手,不同警觉度矿工在风险感知任务时的大脑激活程度表现出显著差异。正态性检验结果显示,大部分通道的 β 值不服从正态分布($p<0.05$),因此采用非参数检验进行统计分析,结果如图 4 所示。C1、C5、C6、C9、C15 和 C19 的 β 值在不同警觉度水平下具有显著性差异($p<0.05$)。

对 ROI 区域显著激活的通道分析,如图 5 所示。除 C9 外,高警觉度矿工通道的脑部激活水平

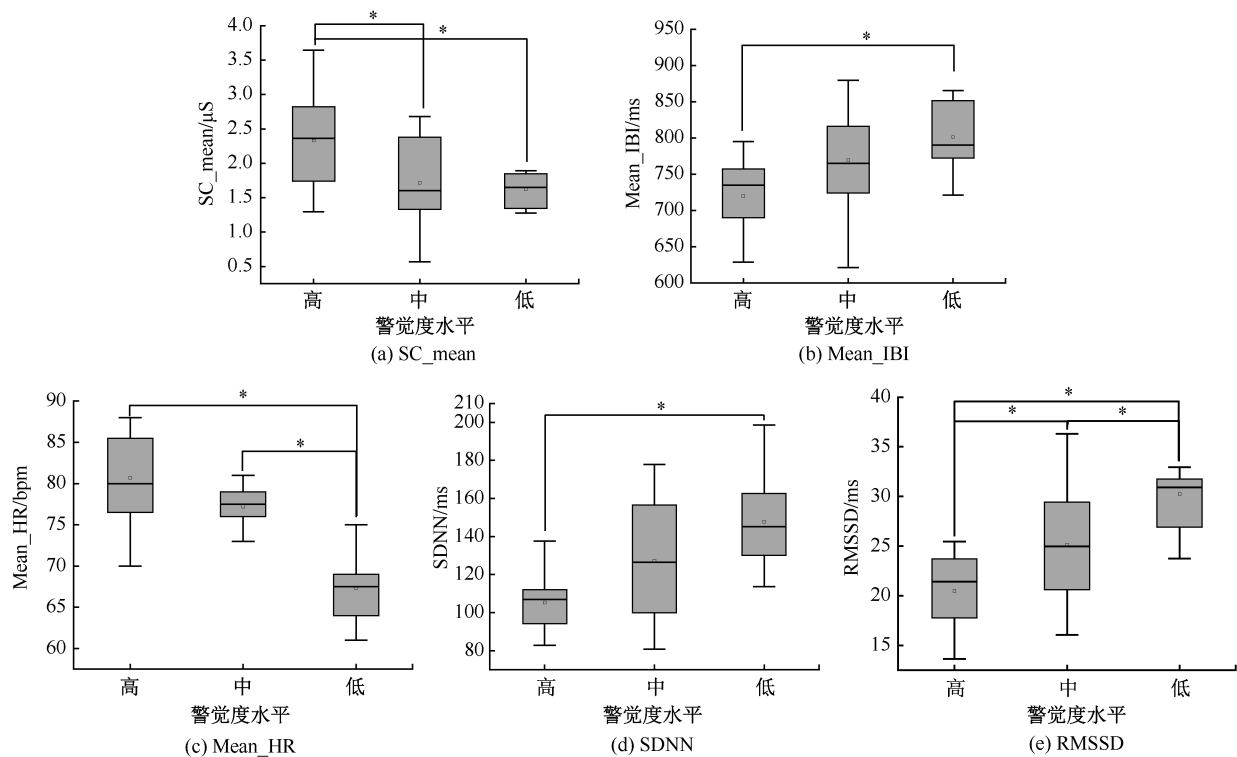
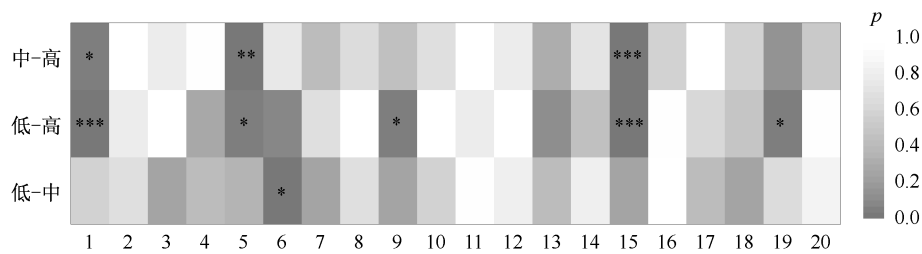


图 3 生理指标差异
Fig. 3 Differences in physiological indicators



注: ** 为 $p<0.01$; *** 为 $p<0.001$ 。

图 4 通道显著性
Fig. 4 Channel saliency

显著高于低警觉度矿工。C5 激活指数呈高警觉度>低警觉度>中警觉度,这可能表明:低警觉度矿工在疲劳状态下可能遇到其他的认知挑战,大脑需额外调动资源以维持任务执行,随着警觉度的提升,资源需求降低,激活指数下降,到达高警觉度时,矿工采取更为主动的策略来优化决策过程,表现为激活指数上升。C15、C19 与 C6 激活指数随警觉度提升持续增加,背外侧前额叶区域在高警觉度状态下对任务的执行依赖更强,矿工在清醒状态下更能主动调节认知资源^[14],且高警觉度矿工在复杂认知和注意维持方面投入了更多资源。高度清醒时,矿工持续保持对风险线索的注意和对行动计划的监控^[15],额极区保持较高激活来支持高级认知操作,这与额极

区在支持复杂决策和多任务中的作用一致。C9 表现出先上升后下降的趋势,中警觉度矿工可能经历了最多的策略权衡或注意力调整,高警觉度矿工的注意力可能更加直接地指向外部危险信号,不再需要频繁的切换内外信息。C1 持续上升可能表示高警觉度矿工可能对环境威胁线索产生更强的情绪反应,并参与调控情绪使其保持适当水平,这种增强的参与有助于更有效的风险判断^[16]。

3 矿工风险感知能力识别模型建立

3.1 SSA-BP 麻雀搜索算法

麻雀搜索算法 (Sparrow Search Algorithm, SSA)^[17-18]是模拟麻雀觅食与逃避危险的行为。麻雀

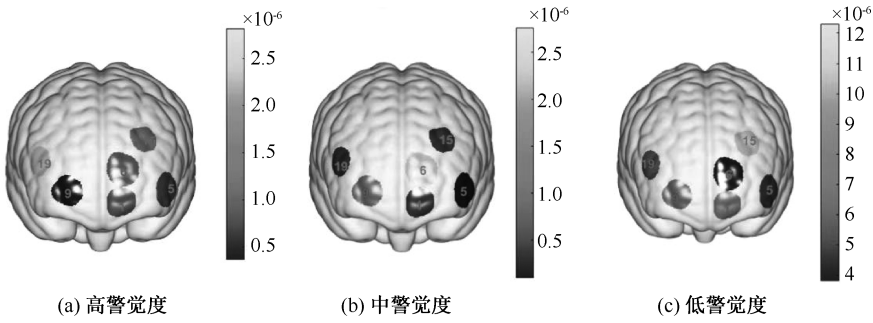


图5 不同警觉度矿工的激活差异性

Fig. 5 Activation differences of miners with different alertness

群体的觅食行为包括发现者寻找食物、加入者跟随发现者发现食物位置、警戒者决定该群体是否放弃食物。

发现者位置更新表达式为:

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} X_{ij}^t \exp\left(-\frac{i}{U_a}\right), ST > R_2 \\ X_{ij}^t + QL, ST \leq R_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_{ij}^{t+1} 为 $t+1$ 次迭代中第 i 个麻雀在第 j 个维度上的位置, t 为当前迭代数; U_a 为最大迭代次数; a 为 $(0, 1]$ 的随机数; ST 为安全阈值 (Safety Threshold, ST); R_2 为预警值; L 为多各因素均为 1 的一行多维矩阵; Q 为随机数。

加入者位置更新表达式为:

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} Q \exp\left(\frac{X_p^t - X_{ij}^t}{t^2}\right), i > \frac{n}{2} \\ X_p^{t+1} + |X_{ij}^t - X_p^{t+1}| A^+ L, i \leq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: X_p^{t+1} 为发现者的最优位置; X_w^t 为当前全局最差位置; A 为一行多维矩阵, 元素随机赋值为 1 或 -1, $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ 。

警戒者位置更新表达式为:

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} X_b^t + \gamma |X_{ij}^t - X_b^t|, f_i > f_g \\ X_{ij}^t + K \left[\frac{X_{ij}^t - X_w^t}{(f_i - f_w) + \varepsilon} \right], f_i = f_g \end{cases} \quad (3)$$

式中: γ 为步控参数; X_b^t 为当前最佳位置; f_g 为当前全局最佳适应度; f_i 为第 i 个麻雀的适应度值; f_w 为当前全局最差适应度值; K 为随机数; ε 为避免分母为零的常数。

3.2 Sine-SSA-BP 算法识别模型的建立

SSA-BP 算法能够有效解决 BP 神经网络陷入局部最优解的问题,但在 SSA-BP 算法中,麻雀的初始位置是随机生成的。因此,进一步引入正弦混沌映射来初始化麻雀的位置,能够有效帮助 SSA 算法跳出局部极值,从而提高算法的全局搜索能力和鲁棒性。同时, Sine-SSA-BP 神经网络参数设定需结合具体情况而定,由式(1)、式(2)、式(3)计算各更新位置,更新最优适应度,得到最优阈值与权重值。

Sine-SSA-BP 神经网络矿工风险感知分类识别模型建立流程如图 6 所示。

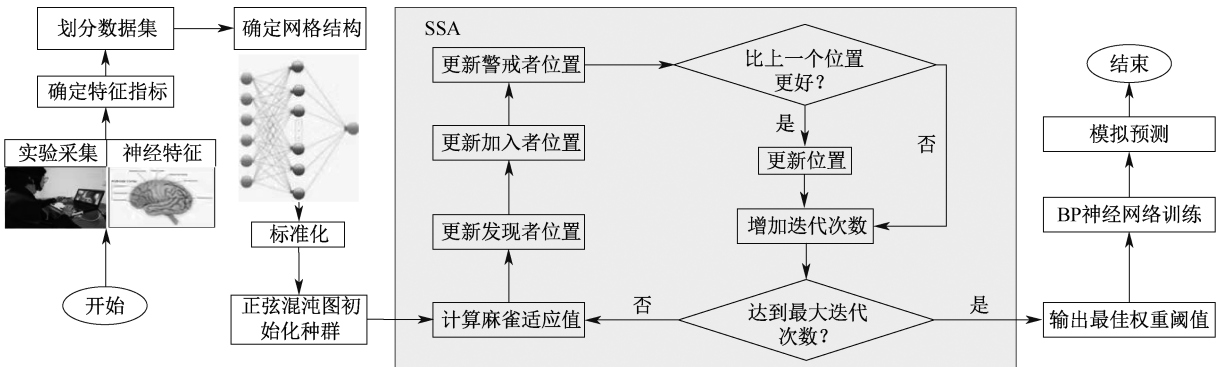


图6 Sine-SSA-BP 神经网络分类识别模型

Fig. 6 Sine-SSA-BP neural network classification and recognition model

3.3 参数设定与模型识别

通过 K-means 聚类法对矿工的风险感知正确率

指标进行聚类,划分为低、中、高 3 个风险感知能力等级,使用 1、2、3 标注,将处理后的数据划分为

27 份训练集与 13 份测试集。通过对比矿工警觉度水平与表征风险感知能力的 13 个指标与剔除警觉度水平后的 12 个特征指标,有效验证警觉度对风险感知能力的影响。通过多轮训练模型中的误差收敛表现与性能反馈,确定最优参数配置为:误差容限设定为 0.000 1,学习率为 0.01。当隐含层节点为 4 时,模型性能最优,因此形成“13-4-3”以及“12-4-3”的 BP 神经网络拓扑结构。

选取准确率、精准率、召回率和 F_1 分数来评估模型的性能。其中,准确率表示其正确识别的样本数与总样本数的比值;精准率表示识别为正的样本中实际为正的的概率;召回率表示实际为正的样本中被识别为正的的概率; F_1 分数则为精准率与召回率的加权调和平均。

对比 BP、SSA-BP、Sine-SSA-BP 等 3 种算法的性能指标,见表 2,下标 1 为剔除警觉度指标后的识别结果,下标 2 为全特征指标识别结果。BP 算法中,剔除警觉度指标后精准率、召回率与 F_1 分数下降,表明:警觉度在优化模型对正类识别的能力上有显著作用。SSA-BP 与 Sine-SSA-BP 算法在剔除警觉度指标后各性能指标均显著下降,能够有效表明警觉度对风险感知的重要影响。Sine-SSA-BP 算法的性能指标最优,表明:通过正弦混沌映射改进策略对风险感知分类识别有效,能够有效分类识别矿工的风险感知能力。

表 2 性能指标对比

Table 2 Comparison of performance indicators %				
算法	准确率	精准率	召回率	F_1 分数
BP ₁	76.92	70.00	77.77	73.33
BP ₂	76.92	80.00	80.00	80.00
SSA-BP ₁	76.92	80.00	80.00	80.00
SSA-BP ₂	84.61	81.82	90.00	85.26
Sine-SSA-BP ₁	84.61	81.82	81.82	81.82
Sine-SSA-BP ₂	92.30	90.91	90.91	90.91

4 结 论

1) 矿工警觉度对风险感知能力存在显著影响。不同警觉度矿工的风险感知正确率具有显著性差异,高警觉度矿工的风险识别正确率显著高于低警觉度矿工。

2) 随着警觉度的升高,矿工的生理指标存在显著变化。低、中、高警觉度矿工的背外侧前额叶区域以及极区激活指数 β 值具有显著差异,且随着警觉度水平的升高,EDA 中的 SC_mean 显著升高,HRV 中的 Mean_IBI、SDNN、RMSSD 显著降低,Mean_HR 显著升高。

3) 引入混沌映射优化 SSA-BP 神经网络后,相比于传统 BP 神经网络识别准确率显著提升,高达 92.30%,综合性能更优。Sine-SSA-BP 神经网络能够有效识别不同警觉度矿工的风险感知能力,为煤矿安全管理提供更可靠的决策支持。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国全国人民代表大会常务委. 中华人民共和国安全生产法[Z]. 2021-09-01.

[2] 刘全龙, 法子薇, 李新春, 等. 数据为证: 各类煤矿事故致因差异化分析与危险源管控研究[J]. 管理工程学报, 2024, 38(5): 277-291.
LIU Quanlong, FA Ziwei, LI Xinchun, et al. Evidence from data: differentiated analysis of causes of various coal mine accidents and research on hazard source control[J]. Journal of Management Engineering, 2024, 38(5): 277-291.

[3] 成连华, 张璇, 郭慧敏, 等. 智能化背景下矿工风险感知水平对不安全行为产生的影响[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(6): 1 041-1 049.
CHENG Lianhua, ZHANG Xuan, GUO Huimin, et al. Impact of miners' risk perception levels on unsafe behaviors in the context of intelligent mining [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(6): 1 041-1 049.

[4] 李乃文, 房小凯. 睡眠剥夺对矿工风险感知的影响研究: 基于生理试验[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(3): 1 036-1 043.
LI Naiwen, FANG Xiaokai. Effect of sleep deprivation on miners' risk perception: based on physiological experiment [J]. Journal of Safety and Environmental Science, 2024, 24(3): 1 036-1 043.

[5] 倪国栋, 方亚琦, 张琦, 等. 风险倾向对新生代建筑工人危险感知的影响机制[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 221-229.
NI Guodong, FANG Yaqi, ZHANG Qi, et al. Influencing mechanism of risk propensity on hazard perception of new

- generation of construction workers[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(5): 221–229.
- [6] SASAKI T, YAMADA K, OBUCHI H, et al. The development and validation of a Japanese hazard perception task[J]. *Traffic Injury Prevention*, 2025: 1–9.
- [7] 马颖, 丁周敏, 李金洲. 基于食品类别的消费者食品安全风险感知状态的分类方法研究[J]. *武汉理工大学学报: 社会科学版*, 2015, 28(2): 146–152.
- MA Ying, DING Zhoumin, LI Jinzhou. Classification Method of consumer food safety risk perception based on food categories [J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Social Science Edition*, 2015, 28(2): 146–152.
- [8] CHANDRAKUMAR D, DORRIAN J, BANKS S, et al. The relationship between alertness and spatial attention under simulated shiftwork[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): DOI: 10.1038/s41598-020-71800-6.
- [9] TIAN Chenning, LI Hongxia, TIAN Shuicheng, et al. The neurocognitive mechanism linking temperature and humidity with miners' alertness: an fNIRS study[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): DOI: 10.1038/s41598-024-62674-z.
- [10] CANALES-JOHNSON A, BEERENDONK L, BLAIN S, et al. Decreased alertness reconfigures cognitive control networks[J]. *Journal of Neuroscience*, 2020, 40(37): 7142–7154.
- [11] ANTLE C A, YAMAZAKI E M, CASALE C E, et al. The 3-minute psychomotor vigilance test demonstrates inadequate convergent validity relative to the 10-minute psychomotor vigilance test across sleep loss and recovery[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2022, 16: DOI: 10.3389/fnins.2022.815697.
- [12] 王璐琪, 姜劲, 孙子恒, 等. 基于 fNIRS 和 ECG 的大脑警觉度客观检测研究[J]. *载人航天*, 2023, 29(2): 177–185.
- WANG Luqi, JIANG Jin, SUN Ziheng, et al. Objective detection of brain vigilance based on fNIRS and ECG [J]. *Manned Spaceflight*, 2023, 29(2): 177–185.
- [13] WICKENS C. Attention: theory, principles, models and applications[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2021, 37(5): 403–417.
- [14] XIA Xue, LI Yansong, WANG Yanqiu, et al. Functional role of dorsolateral prefrontal cortex in the modulation of cognitive bias[J]. *Psychophysiology*, 2021, 58(10): DOI: 10.1111/psyp.13894.
- [15] LAW C K, KOLLING N, CHAN C C H, et al. Frontopolar cortex represents complex features and decision value during choice between environments[J]. *Cell Reports*, 2023, 42(6): DOI: 10.1016/j.celrep.2023.112555.
- [16] ROLLS E T, CHENG Wei, FENG Jianfeng. The orbitofrontal cortex: reward, emotion and depression[J]. *Brain Communications*, 2020, 2(2): DOI: 10.1093/braincomms/fcaa196.
- [17] 田水承, 李红妍, 石炎彬, 等. 噪声暴露时间对矿工风险感知的影响: 来自 fNIRS 的证据[J]. *矿业科学学报*, 2025, 10(3): 522–530.
- TIAN Shuicheng, LI Hongyan, SHI Yanbin, et al. The effect of noise exposure duration on miners' risk perception: evidence from fNIRS[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2025, 10(3): 522–530.
- [18] 汪伟, 崔欣超, 祁云, 等. 改进 SSA 优化 BPNN 的煤体瓦斯渗透率预测模型[J]. *中国安全科学学报*, 2025, 35(2): 137–143.
- WANG Wei, CUI Xinchao, QI Yun, et al. Improving SSA and optimizing BPNN for coal gas permeability prediction model[J]. *China Safety Science Journal*, 2025, 35(2): 137–143.



作者简介: 田水承 (1964—),男,山东淄博人,博士,教授,主要从事安全与应急管理和行为安全方面的研究。E-mail:tiansc@xust.edu.cn。